

УДК 536.24

¹С.І. Маринін, ²Ю.Л. Скоренький

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
Україна

² Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Україна

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ОХОЛОДЖЕННІ РІДИНИ

S. Marynin, Yu. Skorenkyu

KINETICS OF THERMODYNAMIC PROCESSES AT LIQUID COOLING

Інформацію про значення температури води в різних точках об'єму посудини використовують для проектування раціональних систем охолодження чи нагрівання. В реальних умовах часто спостерігається нерівномірне нагрівання чи охолодження рідин по поверхні та об'єму. Нами було експериментально досліджено процес охолодження рідини у холодильнику за неоднорідних зовнішніх умов та проаналізовано умови виникнення ефекту Мпемби – термодинамічного парадоксу, згідно з яким гаряча вода за певних умов замерзає швидше холодної [1]. Сьогодні існує декілька можливих пояснень ефекту [2,3], пов'язаних з впливом нерівномірного випаровування, переохолодженням чистої рідини, залежністю теплопровідності від температури, особливостями конвекційних потоків, наявністю розчинених речовин, впливом характеру водневих зв'язків та ін. Важливість того чи іншого з вказаних факторів та їх конкуренцію можна досліджувати як експериментально, так і теоретично. В загальній теоретичній моделі резервуар з водою поміщений в холодильне середовище і в системі паралельно відбуваються процеси теплообміну з навколишнім середовищем, випаровування води, кристалізації води (утворення льоду), а також ряд інших процесів, що відбуваються в самій рідині. Кількість теплоти, що втрачається на теплообмін з навколишнім середовищем складається з трьох частин: кількості теплоти, що передається через стінки контейнера, кількості теплоти що передається з поверхні води і кількості теплоти, що передається через дно посудини. Необхідно також враховувати кількість теплоти, що йде на випаровування води і утворення льоду. Аналіз тривимірної моделі приводить до системи диференціальних рівнянь, в яких ключову роль відіграють градієнти температури в об'ємі та на поверхнях, які його обмежують. Саме ці характеристики доцільно визначати експериментально.

Для проведення експериментів була розроблена установка на основі цифрових датчиків температури DS18B20 [4], з'єднаний з комп'ютером через порт USB. Використавши його, ми змогли вимірювати температуру в діапазоні від -55 до +125°C з достатньо високою точністю. Абсолютна похибка вимірювання температури становить 0,5 °C, але сумісне використання кількох датчиків дозволяє знімати дані зі значно меншою похибкою. Конструкція установки дозволила вимірювати температуру води по всьому об'єму невеликої посудини. Використовуючи програму BM1707 (), дані експерименту можна візуалізувати на екрані комп'ютера, записувати та здійснювати первинну обробку в режимі реального часу. Температуру води в різних точках посудини та поза нею вимірювали 9 датчиків. Їх розміщення було вибрано згідно з математичною моделлю явища. Заміри температури всіма датчиками здійснювалися кожних 30 с (в деяких експериментах – кожні 2 с знімалися дані про температуру); в режимі реального часу проводилось спостереження за протіканням процесів, ввівся електронний журнал експерименту. На основі отриманих експериментальних даних було розраховано градієнти температури та побудовано їх залежності від часу для кожного конкретного

експерименту. Вимірювання твердості води показали, що загальна мінералізація холодної води перед експериментом становила 220 – 320 ppm, а після нього (охолодження-замерзання-розмерзання) – в межах 100 ppm. Твердість гарячої води перед експериментом значно перевищувала показники холодної і становила більше 1000 ppm, причому з охолодженням води загальна мінералізація зменшувалась. Отримані результати дозволяють заперечити гіпотези пояснення ефекту Мпемби, пов'язані з розчиненими солями у воді. Проведені експерименти та їхній аналіз засвідчили, що процеси теплообміну та охолодження гарячої і холодної води сильно відрізняються. На перебіг кожного процесу впливають багато факторів, жодним з яких не можна нехтувати. Гаряча вода охолоджується інтенсивніше, ніж холодна, але все-одно довше. Холодна вода починає замерзати зверху, тобто саме з поверхні рідини віддає найбільшу кількість теплоти, гаряча ж починає замерзати одночасно і зверху, і знизу, тобто віддає більшу кількість теплоти за одиницю часу, що може бути вирішальним фактором у поясненні ефекту Мпемби. Причому якщо процес теплообміну між «частинами» гарячої води відбувається практично стабільно, то у холодної води існує багато особливостей процесу, а внутрішній теплообмін в ній відбувається з меншою інтенсивністю.

Графіки, побудовані на основі отриманих даних, дозволяють проводити аналіз впливу різноманітних механізмів теплообміну на швидкість охолодження рідин, визначати температурні межі ефективності конвекційних процесів тощо. Отримані часові та просторові залежності та термодинамічні процеси, які вони характеризують, ґрунтовно проаналізовано на основі сформульованої теоретичної моделі явища та визначено види та режими теплообміну, важливі для конкретних термодинамічних процесів у рідинах.

Література

1. Pankovic V., Kapor D.V. Mpemba effect, Newton cooling law and heat transfer equation // Preprint arXiv:1005.1013 – 2010.
2. Wang A., Chen M., Vourgourakis Ya., Nassar A. On the Paradox of Chilling Water: Crossover Temperature in the Mpemba Effect // Preprint arXiv:1101.2684 – 2011.
3. Xi Zhang Yongli Huang, Zengsheng Ma, Sun Chang Q. O:H-O Bond Anomalous Relaxation Resolving Mpemba Paradox // Preprint arXiv: 1310.6514 – 2013.
4. DS18B20, Programmable Resolution, 1-Wire Digital Thermometer : Datasheet. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу - <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.